

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕЙ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Костиков Е.С.¹, Лобаев А.Н.¹, Малыгин А.Л.¹, Мясников В.М.¹

¹ФГОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, ГСП-41, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24), e-mail: sekretar@dfngtu.nnov.ru

Рассматривается вакуумно-камерный способ течеискания, основанный на накоплении утечки пробного газа в пористой мембране, размещённой в подвижной вакуумной камере. На основе этого способа разработано устройство локализации течей, состоящее из накопительной пористой мембраны с газонепроницаемой верхней гранью и датчика потока (давления) пробного газа. На основе метода квазигомогенного приближения и фенологического подхода процесса массопереноса в режиме свободномолекулярного течения газа в пористой среде получена математическая модель, описывающая концентрационное поле утечки пробного газа в подвижной пористой мембране в окрестности течи. Компьютерное моделирование в среде LabVIEW позволило получить картину эволюции концентрационного поля утечки пробного газа, а также зависимости изменения средней концентрации утечки пробного в области расположения датчика от времени.

Ключевые слова: контроль герметичности, течеискание, вакуумно-камерный способ, пористая мембрана, датчик, пробный газ, устройство локализации течи, утечка.

MATHEMATICAL MODEL DETECTING LEAKS LOCALIZATION IN BIG-VOLUME GOODS

Kostikov E.S.¹, Lobaev A.N.¹, Malygin A.L.¹, Myasnikov V.M.¹

¹Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, Minina St., 24), e-mail: sekretar@dfngtu.nnov.ru

We consider vacuum chamber leak detection method based on the accumulation of trial gas leakage in a porous membrane disposed in the movable vacuum chamber. Based on this method, an apparatus of leaks localization has been developed; this apparatus consists of a cumulative porous membrane with gas-tight top face and a flow (pressure) transducer of trial gas. On the basis of quasi-homogeneous approximation and phenological approach to mass transfer in the mode of free-flow of gas in the porous medium the mathematical model describing the concentration field of trial gas leakage in the mobile cellular membrane in the vicinity of the leak has been detected. Computer modeling in the LabVIEW environment made it possible to obtain information about the evolution of concentration field of trial gas leakage as well as the information concerning the dependence of average concentration of trial gas leakage located near the transducer, on time.

Keywords: tightness control, leak detection, vacuum-chamber method, porous membrane, transducer, trial gas, leaks localization apparatus, leakage.

В современной химической отрасли промышленности предъявляются повышенные требования к герметичности крупногабаритного оборудования, что связано с наличием в них

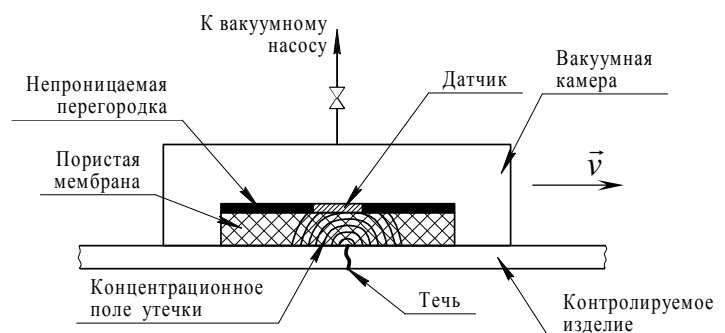


Рис. 1. Принципиальная схема локализатора течей.

большого количества взрывопожароопасных и токсичных веществ. Нормативными документами устанавливаются требования по проведению процедуры контроля герметичности, заключающейся в обследовании всех имеющихся в таких изделиях сварных швов, в частности методами течеис-

кания. Однако имеющиеся методы неразрушающего контроля течеисканием являются неэффективными при большой протяжённости швов, так как имеют высокий уровень трудозатрат и плохо поддаются автоматизации [3].

Для повышения эффективности процедуры контроля был предложен вакуумно-камерный способ течеискания, основанный на накоплении утечки пробного газа (ПГ) в пористой среде, размещённой в подвижной вакуумной камере. На основе этого способа было разработано устройство локализации течей (ЛТ) [2], состоящее из накопительной пористой мембраны с газонепроницаемой верхней гранью и датчика потока (давления) пробного газа (рис. 1).

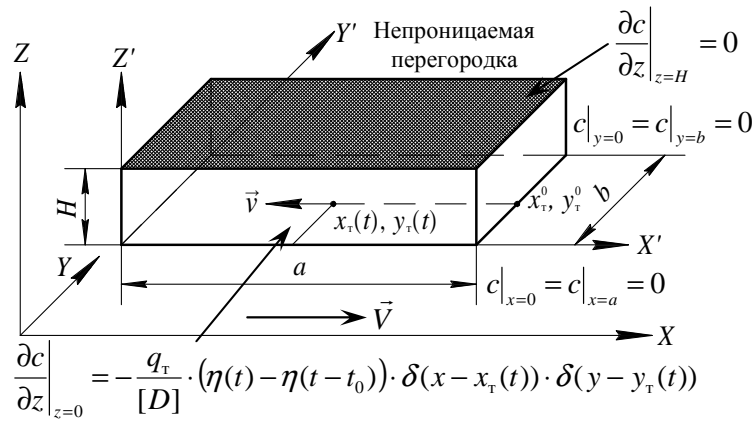


Рис. 2. К выводу математической модели переноса газа в случае подвижной пористой мембраны.

В условиях испытания на герметичность в устройстве происходит нестационарный массоперенос в пористой среде. Для описания данного процесса получена математическая модель:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} = [D] \Delta c, \quad (1)$$

$$c|_{x=0} = c|_{x=a} = c|_{y=0} = c|_{y=b} = c_\phi, \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{q_\tau}{[D]} \cdot (\eta(t) - \eta(t - t_0)) \cdot \delta(x - x_\tau(t)) \cdot \delta(y - y_\tau(t)), \quad \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (3)$$

$$\Omega: 0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 \leq z \leq H, \quad (4)$$

$$x_\tau(t) = x_\tau^0 + v_x t, \quad (5)$$

$$y_\tau(t) = y_\tau^0 + v_y t,$$

где ε — пористость материала; $[D]$ — коэффициент эффективной кнудсеновской диффузии; $c \equiv c(x, y, z, t)$ — концентрация ПГ в пористой мембране; c_ϕ — фоновая концентрация ПГ в вакуумной камере; x, y, z — координаты точки в пористом теле; a, b, H — размеры пористо-

го тела; q_T — поток ПГ через течь; $x_T(t), y_T(t)$ — текущие координаты течи; $\delta(\cdot)$ — дельта-функция Дирака; Δ — оператор Лапласа; $\eta(\cdot)$ — единичная функция Хевисайда, $t_0 = a/v_x$ — время перемещения ЛТ над течью (или время движения течи непосредственно под пористой мембраной); x_T^0, y_T^0 — координаты течи в начальный момент времени; v_x, v_y — проекции вектора скорости ЛТ \vec{v} на оси координат $X'Y'$ (рис. 2).

При выводе модели были сделаны следующие допущения:

- используется квазигомогенное приближение — феноменологический подход, при котором уравнения для массопереноса в сплошной среде переносятся на процессы при свободно-молекулярном режиме течения газа [4];
- вне пористого тела поддерживается постоянное разрежение, а флуктуация фоновой концентрации ПГ мала, и можно считать, что $c_\phi = \text{const}$;
- функция источника $Q(x_T(t), y_T(t), 0, t)$ действует в области Ω ;
- движение ЛТ является прямолинейным с постоянной скоростью v ;
- коэффициент эффективной диффузии и релаксационный коэффициент эффективной диффузии равны, что позволяет говорить только об одном коэффициенте эффективной кнудсеновской диффузии $[D]$. Дополнительно примем, что в процессе массообмена $[D]$ изменяется незначительно;
- используя принцип относительности Галилея, примем за неподвижную систему координат $X'Y'Z'$ (связанную с вакуумной камерой) и будем считать, что движется течь (источник).

Решение указанной модели было получено методом функций Грина [5]:

$$c(x, y, z, t) = \frac{4q_T}{\varepsilon abH} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{\delta_m} \sin \frac{\pi nx}{a} \sin \frac{\pi ky}{b} \cos \frac{\pi mz}{H} C(t), \quad (6)$$

$$C(t) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma^2 + W^2} [\gamma \cos(Wt + W_0) + W \sin(Wt + W_0)] - \frac{1}{\gamma^2 + V^2} [\gamma \cos(Vt + V_0) + V \sin(Vt + V_0)] - \\ - \frac{e^{-\gamma t}}{\gamma^2 + W^2} [\gamma \cos(W_0) + W \sin(W_0)] + \frac{e^{-\gamma t}}{\gamma^2 + V^2} [\gamma \cos(V_0) + V \sin(V_0)], & \text{если } t \leq t_0; \\ \frac{e^{-\gamma(t-t_0)}}{\gamma^2 + W^2} [\gamma \cos(Wt_0 + W_0) + W \sin(Wt_0 + W_0)] - \frac{e^{-\gamma(t-t_0)}}{\gamma^2 + V^2} [\gamma \cos(Vt_0 + V_0) + V \sin(Vt_0 + V_0)] - \\ - \frac{e^{-\gamma t}}{\gamma^2 + W^2} [\gamma \cos(W_0) + W \sin(W_0)] + \frac{e^{-\gamma t}}{\gamma^2 + V^2} [\gamma \cos(V_0) + V \sin(V_0)], & \text{если } t > t_0; \end{cases}$$

$$\gamma = \pi^2 \frac{[D]}{\varepsilon} \left[\frac{n^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{m^2}{H^2} \right], \quad (7)$$

$$V = \frac{n\pi v_x}{a} + \frac{k\pi v_y}{b}, \quad W = \frac{n\pi v_x}{a} - \frac{k\pi v_y}{b},$$

$$V_0 = \frac{n\pi x_r^0}{a} + \frac{k\pi y_r^0}{b}, \quad W_0 = \frac{n\pi x_r^0}{a} - \frac{k\pi y_r^0}{b},$$

$$\delta_m = \begin{cases} 2, & \text{если } m = 0; \\ 1, & \text{если } m \neq 0. \end{cases}$$

Компьютерное моделирование в среде LabVIEW позволяло получить картину эволюции концентрационного поля утечки пробного газа (рис. 3). На графиках концентрация выражена в единицах давления (Па).

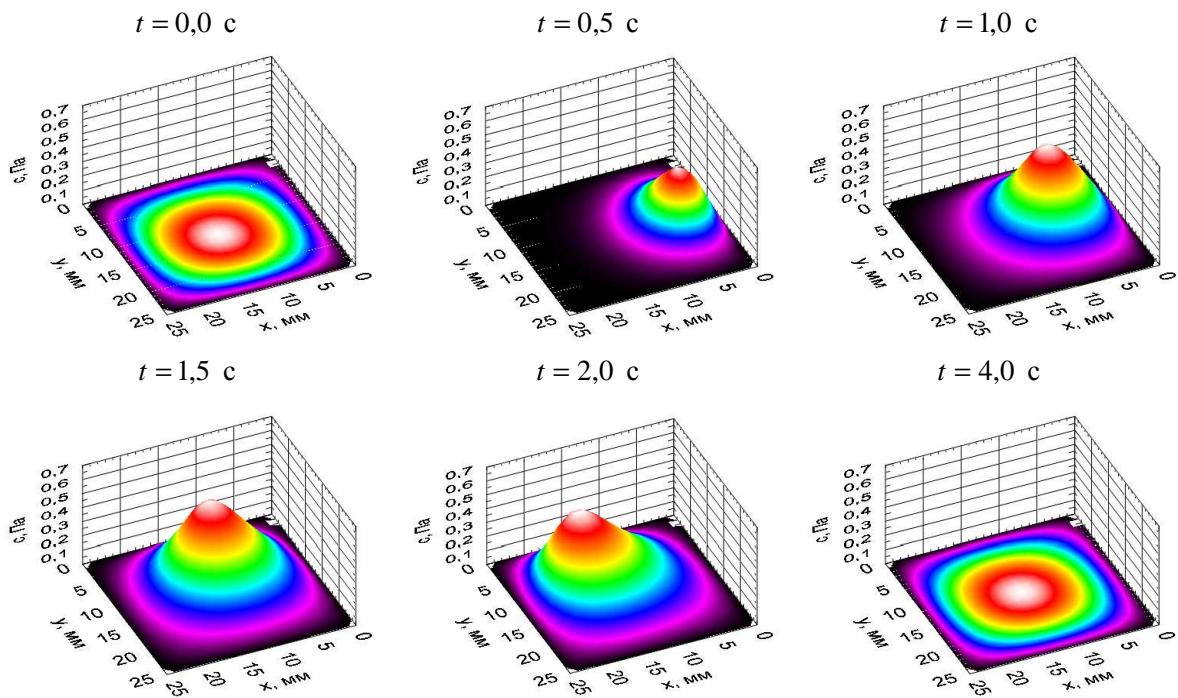


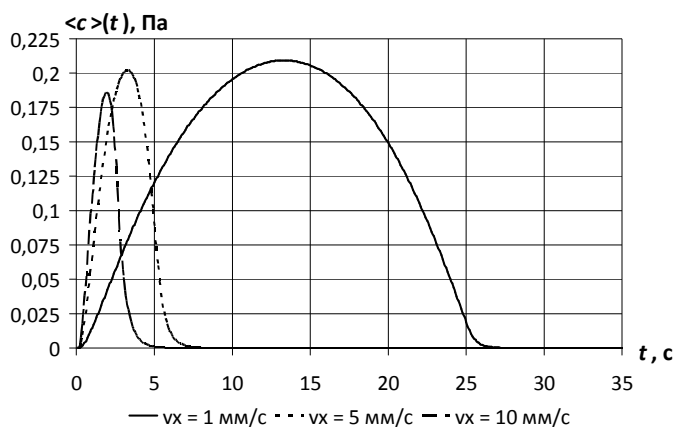
Рис. 3. Эволюция концентрационного поля утечки пробного газа в плоскости $z = H$.

Параметры моделирования: $a = b = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $H = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $y_r^0 = 12,5 \cdot 10^{-3}$ м,

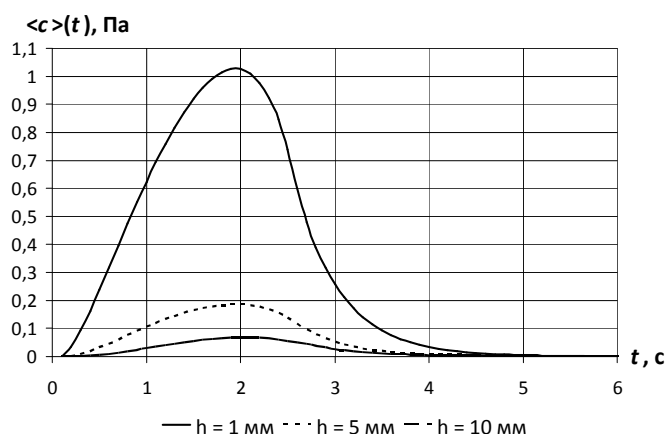
$$q_r = 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}, [D] = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, v_x = 0,01 \text{ м}/\text{с}.$$

В начальный момент времени распределение ПГ обусловлено фоновой составляющей. При дальнейшем развитии временного процесса в распределении КПУПГ можно выделить первоначальную стадию накопления ПГ в поровом пространстве (приблизительно до 2-й секунды) и дальнейший релаксационный процесс, связанный с освобождением пористой структуры от накопленного ПГ ($t > 2,0$ с).

Усреднив концентрацию по всей верхней грани пористого материала (непосредственно под непроницаемым слоем), получим следующий график зависимости средней концентрации $\langle c \rangle$ от времени (рис. 4). Данный график является моделью дефектоскопического



а)



б)

Рис. 4. Зависимость средней концентрации (в ед. давления) на верхней грани пористого материала при зависимости
а) — от скорости перемещения ЛТ;
б) — от толщины пористой мембраны.

сигнала, полученного от устройства локализации течей.

Аналитическое решение (6) — (7) математической модели (1) — (5) позволяет выявить характер влияния конструктивных (геометрические размеры датчика утечки) и режимных параметров (скорость перемещения) на порог чувствительности устройства локализации течей, быстродействие и достоверность контроля.

Для анализа дефектоскопической информации был разработан алгоритм [1], основанный на цифровой обработке сигнала в среде разработки виртуальных приборов NI LabVIEW. Данный алгоритм позволяет с помощью программно-аппаратных средств сделать заключение о достоверности дефектоскопической информации, а проводимый в ходе работы программы анализ параметров дефектоскопического сигнала позволяет определять такие

параметры течи, как поток ПГ через нее и ее положение относительно траектории.

Указанное устройство может быть использовано в составе высокоэффективных систем контроля герметичности в автоматизированном (в том числе, дистанционном) режиме.

Список литературы

1. Костиков Е.С. Исследование вакуумно-камерного способа локализации течей и разработка устройства с датчиком по теплопроводности : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. — М., 2012. — 23 с.
2. Костиков Е.С., Мясников В.М., Сажин С.Г. Устройство для локализации течей // Патент №101187 RU, МПК⁷ G01 M3/02. — Бюл. № 1, 2011.
3. Неразрушающий контроль : справочник. В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. — Т. 2 : в 2 кн.

— Кн. 1. Контроль герметичности. — М. : Машиностроение, 2003. — 668 с.

4. Николаев Н.И. Диффузия в мембранах. — М. : Химия, 1980. — 232 с.

5. Соболев С.Л. Уравнения математической физики. — 4-е изд. — М. : Наука, 1966. — 444 с.

Рецензенты:

Луконин В.П., д.т.н., профессор, генеральный директор ФГУП «НИИ полимеров им. академика В.А. Каргина», г. Дзержинск.

Добротин С.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры математики и естественно-научных дисциплин ФГОУ ВПО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Дзержинский филиал», г. Дзержинск.